

УДК 621.793.72+621.785.54

*В. С. Верхорубов, С. В. Невежин*

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

*С. Д. Неулыбин, А. И. Панов*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ ТИПА Fe-C-CR-TI-AL ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ

*Рассмотрено влияние плазменного оплавления на стойкость напыленных покрытий из порошковых проволок системы Fe-C-Cr-Ti-Al к абразивному износу. Представлены результаты исследований износостойкости и структуры напыленных и оплавленных покрытий, а также наплавленного металла из представленных проволок. Установлено, что изменение структуры и плотности покрытий после оплавления, обуславливает значительное повышение твердости и износостойкости покрытий.*

*Ключевые слова: металлизационное покрытие, порошковая проволока, плазменное оплавление, наплавка, структура, износостойкость.*

*V. S. Verkhorubov, S. V. Nevezhin, S. D. Neulybin, A. I. Panov*

## WEAR RESISTANCE OF COATINGS FE-C-CR-TI-AL TYPE AFTER PLASMA REMELTING

*The effect of plasma remelting on abrasive wear resistance of arc-sprayed coatings from cored wires of Fe-C-Cr-Ti-Al was considered. The results of investigations of structure and wear resistance of sprayed and fused coatings and weld metal from the provided feedstock were presented. It was found that the change of the structure and density of coating after remelting, caused a significant increase in hardness and wear resistance of coatings.*

*Keywords: arc-sprayed coating, powder wire, plasma remelting, surfacing, structure, wears resistance.*

Для повышения ресурса узлов оборудования, работающих в условиях абразивного изнашивания эффективно применяются напыленные покрытия из порошковых проволок ППМ-6 и 8 системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al [1; 2]. Однако, наличие пор и слоистой структуры металлизационных покрытий

приводит к снижению их износостойкости [3; 4], а достаточно низкая адгезия покрытия (20–35 МПа) в условиях эксплуатации может привести к отслоению. С целью улучшения характеристик напыленных покрытий их подвергают последующему оплавлению концентрированными источниками нагрева [5–7]. По параметрам стоимости, мобильности и универсальности оборудования наиболее перспективным источником является сжатая (плазменная) дуга [8].

Данная работа проводилась с целью определения влияния плазменного оплавления на абразивную износостойкость покрытий, полученных методом активированной дуговой металлизации из порошковых проволок системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al.

В качестве основы для нанесения покрытий были использованы пластины из качественной стали 40 размерами 240×70×10. Напыляемый материал – порошковая проволока марки ППМ-8 (80X22T2Ю2)Ø 2 мм.

Перед нанесением покрытия производилась дробеструйная обработка поверхности покрытия.

Для нанесения покрытий толщиной 1,7–2 мм использовали аппарат активированной дуговой металлизации АДМ-10 [9]. Напыление производилось под прямым углом к поверхности изделия, на параметрах, представленных в табл. 1.

*Таблица 1*

Параметры режима активированной дуговой металлизации

Ток, А	Напряжение, В	Скорость напыления, м/мин	Дистанция напыления, мм	Давление воздуха, МПа	Давление пропана, МПа
200	28	6	100	0,30	0,32

Плазменное оплавление металлизационного покрытия осуществлялось на оборудовании, разработанном на кафедре «СП и ТКМ» ПНИПУ [10]. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Параметры режима плазменной обработки приведены в табл. 2.

Параметры режима плазменного оплавления

Ток, А	Диаметр сопла, мм	Скорость обработки, м/ч	Дистанция обработки, мм	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Расход защитного газа, л/мин
160	4	6	5	2,5	4,5

Из пластины с нанесенным металлизационным покрытием, до и после плазменного оплавления, с помощью электроэрозионного проволоочно-вырезного станка AGIE CHARMILLES CUT 20 были вырезаны образцы размерами – 10×10×10 мм.

Микроструктурные исследования выполнены на металлографическом микроскопе Альтами, микротвердость по сечению покрытий измеряли на микротвердомере Shimadzu HNV-G21DT при 0,5 Н (50 гс) и 3 Н (300 гс), фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в Cr- $k_{\alpha}$  излучении.

Износостойкость определяли путем совершения возвратно-поступательных движений поверхности образцов по шлифовальной бумаге на основе электрокорунда. Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с устанавливали равным 60 м. Нормальная удельная нагрузка на образец устанавливалась равной 10 кг, удельная нагрузка 1 МПа. Длина одного рабочего хода образцов составляла 0,125 м, с шагом образца за один рабочий ход – 0,0012 м.

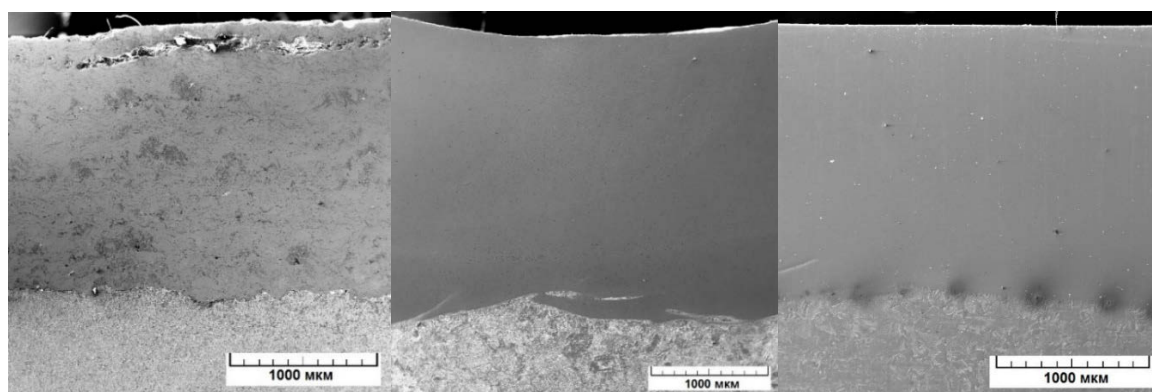


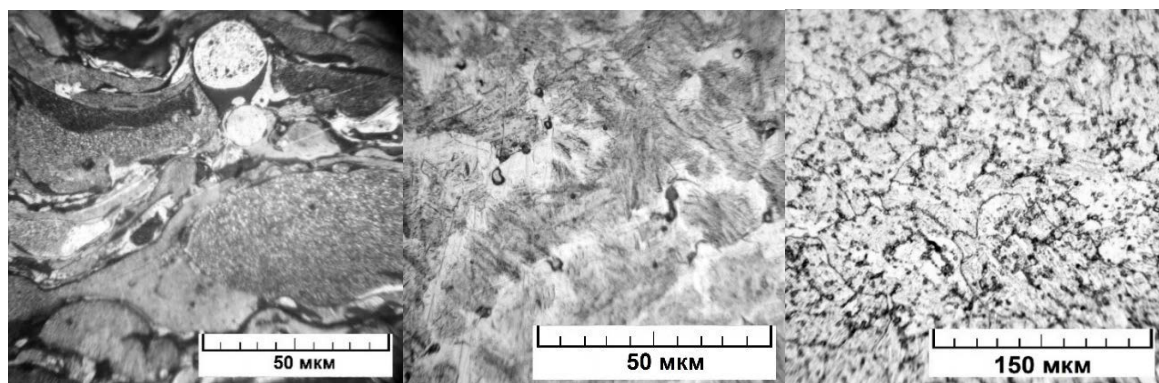
Рис. 1. Макроструктура образцов: а – напыленное покрытие; б – покрытие после плазменного оплавления; в – наплавленного слоя

Металлизационное покрытие имеет слоистую структуру (рис. 1, *а*), характерную для напыленных покрытий. Толщина покрытия составляет 1840 мкм. Видно, что покрытие характеризуется значительной неоднородностью структуры, наличием пор и несплошностей.

Плазменная поверхностная обработка напыленного покрытия привела к его полному переплаву и устранению структурных неоднородностей (рис. 1, *б*). Толщина переплавленного покрытия составляет 2380 мкм. Следовательно, по изменению толщины покрытия, смещение с основой после плазменного оплавления составляет примерно 30 %. Оплавленное покрытие имеет однородную структуру, в которой отсутствуют оксидные фазы, в большом количестве имевшиеся в исходном напыленном покрытии.

Наплавленный металл имеет структуру без видимых границ между слоями (рис. 1, *в*). Толщина слоя составляет 1,75 мм. Наплавка характеризуется отсутствием крупных пор и несплошностей.

Покрытие представляет собой тонкие чередующиеся волнообразные прослойки белого, серого и чёрного цвета, различной величины и конфигурации (рис. 2, *а*). Очевидно, что участки темно-серого и черного цвета являются оксидными прослойками. Металлические фрагменты белого цвета представляют собой твёрдый раствор хрома в аустените и мартенситес большим содержанием легирующих элементов. В наиболее крупных частицах покрытия наблюдается структура точечного характера, похожая на отпускаемый мартенсит с включениями дисперсных карбидов.



*а* *б* *в*  
Рис. 2. Микроструктура образцов: *а* – напыленное покрытие; *б* – покрытие после плазменного оплавления; *в* – наплавленного слоя

Структура переплавленного покрытия имеет дендритное строение и состоит из мартенсита с выделением дисперсных карбидов (рис. 2, б). Форма и размеры зерна по толщине оплавленного слоя сильно меняются, что объясняется особенностями теплоотвода от расплавленного покрытия в основу с большим коэффициентом теплопроводности [11].

Наплавленный металл имеет характерную ячеистую структуру и состоит из легированного мартенсита с выделившимися по границам зерен крупными частицами упрочняющих фаз (рис. 2, в).

Рентгеноструктурный анализ полученных покрытий до и после оплавления подтверждает результаты металлографии, что металлическая матрица всех типов покрытий состоит преимущественно из мартенсита. Единственной надежно регистрируемой фазой всех покрытий является твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа. Других фаз на дифрактограммах не выявлено, вероятно, вследствие их малого количества в покрытиях.

Наиболее высоким уровнем микротвердости, несмотря на низкое содержание легирующих элементов, характеризуется напыленное АДМ покрытие после плазменной обработки, а наименьшим – исходное покрытие (табл. 3). Плазменная обработка, привела к переплавлению данного покрытия, способствовала устранению пористости и оксидных фаз, что обеспечила более равномерное распределение химических элементов и структурных составляющих в покрытии. Присутствующие в напыленном покрытии  $TiAl$  при плазменном оплавлении выступили в роли раскислителя и вышли в шлак. Высокие скорости охлаждения при плазменной обработке, обуславливают образование структуры среднеуглеродистого мартенсита с включениями дисперсных карбидов хрома, что привело к значительному повышению микротвердости напыленного покрытия. Пониженная твердость наплавки объясняется образованием феррито-мартенситной структуры за счет наличия в ней сильных ферритизаторов – Cr и Al, а также высокого содержания Ti, обуславливающего обеднение металлической матрицы углеродом при образовании карбидов.

Таблица 3

## Средняя микротвердость покрытий по сечению

Тип покрытия	Микротвердость	
	HV0,05	HV0,3
АДМ покрытие	460±64	487±50
АДМ покрытие после плазменного оплавления	831±18	753±14
Наплавка	576±18	571±11

По результатам определения потерь массы образцов после испытаний износостойкости по закрепленному абразиву (рис. 3) наибольшую износостойкость имеет покрытие после плазменного оплавления (0,1444 г), а наименьшую – исходное металлизационное покрытие (0,3738 г), при этом износостойкость оплавленного покрытия на 85 % выше износостойкости наплавки (0,2660 г).

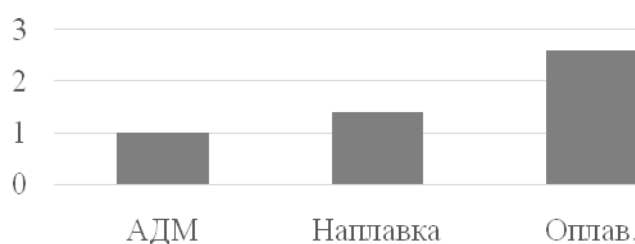


Рис. 3. Относительная износостойкость различных видов покрытий

В условиях абразивного износа высокая износостойкость более однородных оплавленных покрытий с равномерным распределением дисперсных упрочняющих фаз в сравнении с металлизационными покрытиями до оплавления может быть связана с ускоренным микрорезанием последних при попадании абразивных частиц в относительно мягкие пограничные слои и поры.

В тоже время, при однослойной наплавке образуется ферритно-мартенситная структура с выделением карбидов хрома и титана по границам зерен, обуславливающая снижение твердости и износостойкости покрытия.

### Выводы

1. Плазменная обработка металлизационного покрытия системы Fe-Cr-C-Ti-Al приводит к его полному переплавлению и изменению структуры от ламеллярно-пористой до монолитной. В результате быстрой кристаллизации

оплавленного покрытия образуется структура среднеуглеродистого мартенсита с включениями дисперсных карбидов хрома.

2. Установлено, что плазменное оплавление металлизационного покрытия привело к повышению его твердости в 1,5 раза, а износостойкости в 2,5 раза.

3. Пониженная твердость и износостойкость наплавленных слоев обуславливается формированием ферритно-мартенситной структуры.

### *Список литературы*

1. Структура и износостойкость напыленных покрытий системы Fe-Cr-C-TiC метастабильным аустенитом / Ю. С. Коробов [и др.] // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактив. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 100–104.

2. Экономнолегированная порошковая проволока для повышения ресурса эксплуатации плунжеров гидропрессов методом дуговой металлизации / Г. А. Ример [и др.] // Сборник докладов научно-технической конференции «Сварка и диагностика». – Екатеринбург, 2014. – С. 105–111.

3. Wear Performance of Thermally Sprayed and Welded Coatings / C. R. C. Lima, B. V. Bette, F. Camargo, H. C. Fals, V. A. Ferraresi // Using Conventional and Nanostructured Materials. Proc. of ITSC 2013, ASM International. – Busan, Korea, 2013. – P. 424–428.

4. Утенков В. М., Зайцев А. Н. Исследование триботехнических характеристик перспективных износостойких плазменных покрытий при трении скольжения без смазки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2013. – № 11. – С. 81–89.

5. Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления / В. А. Клеменов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 6. – С. 68–75.

6. Спиридонов Н. В., Кардаполова М. А., Девойно О. Г. Влияние лазерного нагрева на износостойкость композиционных покрытий // Трение и износ. – 1988. – Т. 9. № 1. – С. 60–65.

7. H. Pokhmurs'ka N., Chervins'ka M. Student Kh. Zadorozhna. Effect of the laser fusion of electrometallized coatings of the Fe–Cr–B–Al system on their corrosion resistance // Materials Science. – Vol. 42. No. 6. – 2006. – P.837–842.

8. Щицын Ю. Д. Плазменные технологии в сварочном производстве. Ч. 1. – Пермь, 2004. – 73 с.

9. Коробов Ю. С. Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. – 2005. – № 2. – С. 47–49.
10. Плазменная закалка тяжело нагруженных деталей из стали 40Х13 / Д. С. Белинин [и др.] // Вестник Пермского государственного технического университета. – 2011. – Т. 13. № 3. – С. 12–18.
11. Структура напыленных покрытий типа Fe-C-Cr-Ti-Al после плазменного оплавления / В. С. Верхорубов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. Т. 17. № 2. – С. 217–223.